

공기 열원 히트펌프 시스템의 냉난방 통합 성능 예측 프로세스 개발

Development of a prediction process for integrated heating and cooling performance of air source heat pump system

○허 신*

Heo, Shin

김 효 준**

Kim, Hyo-Jun

이 진 현***

Lee, Jin-Hyun

조 영 흠****

Cho, Yeong-Hum

Abstract

This study presents a minimally intrusive, process for predicting air-source heat pump (ASHP) performance based energy balances, refrigerant property evaluation, and pressure-enthalpy (P-h) cycle generation. Implemented on a university R410A system, with properties computed via CoolProp v6.7.0 (HEOS) based energy balance, the method generates a virtual cycle in P-H diagram. Validation met ASHRAE Guideline acceptance criteria; in cooling (27-33 °C) COP decreased with rising outdoor temperature, and in heating (-6-4 °C) COP decreased with falling outdoor temperature. The approach enables accurate, season-agnostic performance prediction with minimal added instrumentation and provides actionable signals for optimization, operations and maintenance, and fault detection and diagnosis.

키워드 : 공기 열원 히트펌프 시스템, 성능 예측, 가상 냉동사이클

Keywords : Air Source Heat Pump system, Performance prediction, Virtual Refrigerant Cycle

1. 서론

HVAC(Heating, Ventilation and Air Conditioning) 시스템의 에너지 효율성에 관한 관심이 증가하며, 부상된 에너지 절감 방안 중 하나는 공기 열원 히트펌프 시스템이다. 낮은 초기 투자 비용과 간편한 설치로 인하여 보편적으로 많이 사용되며, 시장 규모가 증가할 것으로 전망된다. 이처럼 공기 열원 히트펌프 시스템의 수요 및 공급이 증가함에 따라 운영 단계에서 시스템 최적화, 유지관리, 고장 감지 및 진단 등이 필수적인 과제가 되었으며, 효과적인 수행을 위해서는 히트펌프 시스템의 성능 데이터가 중요한 역할을 한다. 하지만 성능 데이터를 위한 냉난방 능력 측정 과정에서 항온·항습 챔버와 같은 공기 조절 장치의 구비 또는 압력계, 유량계 등 추가 계측기기 설치 등 번거로운 작업 및 고가의 비용이 발생할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 최소한의 추가 계측 데이터를 기

반으로 에너지 밸런스, 냉매 특성, P-H 선도 등을 활용하여 공기 열원 히트펌프 시스템의 냉난방 통합 성능 예측 프로세스 제안 및 평가를 목표로 한다. 제안된 방법의 성능 예측 데이터는 히트펌프 시스템의 최적화, 유지관리, 고장 감지 및 진단을 위한 제어 변수로 활용될 수 있다.

2. 방법론

2.1 이론적 고찰

증기 압축 냉동사이클은 냉매의 압축, 응축, 팽창, 증발로 네 과정을 연속적으로 거치며, 냉매의 상태 변화를 이용하여 열을 저온에서 고온으로 이동시키는 일련의 과정이다. 냉매의 물성치를 나타낼 수 있는 그래프는 다양하며, 압력·엔탈피 선도 내 냉동사이클을 아래의 그림 1과 같이 나타낼 수 있다.

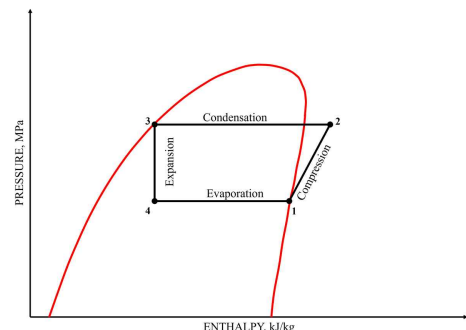


그림 1 P-H 선도 내 냉동사이클 도식화

* 영남대 일반대학원 건축공학전공 석사과정

** 비텍 대표, 공학박사

*** 영남대 건축연구소 연구교수, 공학박사

**** 영남대 공과대학 건축학부 교수, 공학박사

(Corresponding author : School of Architecture Yeungnam University, yhcho@ynu.ac.kr)

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2025-00561486).

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2023-00214493).

2.2 실험 개요

공기 열원 히트펌프 시스템의 냉난방 통합 성능 예측 프로세스 제안을 위하여 경상북도 경산에 위치한 대학교 실험실을 대상 공간으로 선정하였다. 해당 공간은 R410A 냉매를 사용하는 공기 열원 히트펌프 시스템, 중앙식 공기 조화기, 변풍량 시스템이 구축되어 있으며, BAS(Building Automation System)에 의하여 제어된다. 데이터 수집은 BAS 및 계측기기 설치를 통하여 진행되었으며, 데이터 수집은 여름철(7~8월) 냉방 및 겨울철(1~2월) 난방 기간에 진행되었다. 본 연구의 모든 냉매 물성(엔탈피, 엔트로피, 압력 등)은 CoolProp v6.7.0의 HEOS 식을 이용하여 계산하였으며, 물성 호출은 Python API의 PropsSI 함수를 사용하였다.

3. 결과

본 연구의 공기 열원 히트펌프 시스템 냉난방 통합 성능 예측 프로세스를 통하여 냉난방 시 성능 예측을 진행하였다. 제안된 프로세스의 성능 평가는 ASHRAE Guideline의 기준에 만족하였으며, 아래의 표 1과 같다. 대상 공간의 시스템은 히트펌프 출수 설정온도에 따라 제어된다. 해당 과정에서 압축기 동작 프로세스에 따라 측정된 냉동사이클이 변화하며, 예측된 가상 냉동사이클도 유사한 패턴임을 확인하였고 성능 예측 또한 가능하였다.

표 1. ASHP 시스템 냉난방 통합 성능 예측 성능 평가

구분 지표	냉방		난방	
	NMBE(%)	CVRMSE(%)	NMBE(%)	CVRMSE(%)
COP	-5.56	11.39	-9.88	14.15
$\Delta h_{r,OHX}$	-0.58	10.05	-8.88	11.59
$\Delta h_{r,IHX}$	-5.10	10.28	1.29	9.11

3.1 냉방

여름철 냉방 시 성능 예측 프로세스를 위한 실험은 외기 온도 27~33°C 범위 내에서 진행되었으며, 성능 예측 결과 중 하나인 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 외기 온도가 증가함에 따라 COP가 감소하는 것을 확인하였다.

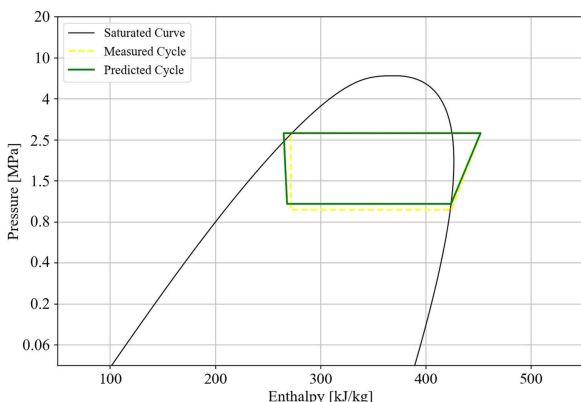


그림 2 여름철 냉방 시 P-H 선도 내 성능 예측 결과

3.2 난방

겨울철 난방 시 성능 예측 프로세스를 위한 실험은 외기 온도 -6~4°C 범위 내에서 진행되었으며, 성능 예측 결과 중 하나인 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 외기 온도가 감소함에 따라 COP가 감소하는 것을 확인하였다.

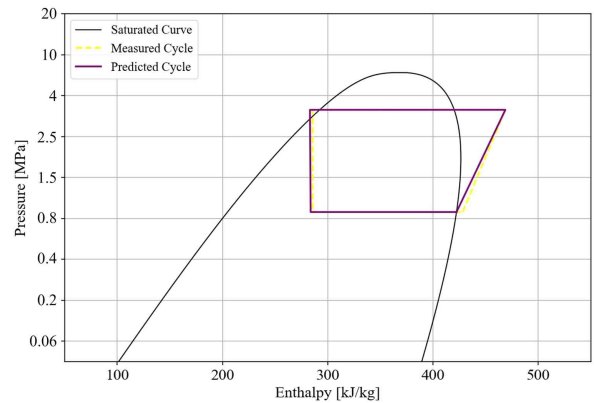


그림 3 겨울철 난방 시 P-H 선도 내 성능 예측 결과

3. 결론

본 연구에서는 에너지 밸런스, 냉매 특성, P-H 선도를 활용하여 최소한의 추가 계측 데이터를 기반으로 공기 열원 히트펌프 시스템의 냉난방 통합 성능 예측 프로세스의 제안 및 성능 평가를 진행하였다. 공기 열원 히트펌프 시스템의 P-H 선도 내 예측된 냉동사이클을 활용하여 성능 예측이 냉난방 시 가능함을 확인하였다. 또한 외기 온도 증감에 따라 COP가 감소하는 공기 열원 히트펌프 시스템의 특징을 결과로써 확인할 수 있었다. 본 연구의 냉난방 통합 성능 예측 프로세스를 통하여 히트펌프 시스템의 최적화, 유지관리, 고장 감지 및 진단을 위한 제어 변수로 활용할 수 있다고 사료된다.

참고문헌

1. TechNavio, Air Source Heat Pump Market, London, United Kingdom, 2023
2. Lee, H. G., Kim, H. J., and Cho, Y. H. (2023). Development of In Situ Refrigeration Cycle Measurement Method Using Air-Side Data of Air Source Heat Pump, Applied Sciences, Vol. 13, No. 16, 9060
3. 허신, 김효준, 이진현, 조영흠. (2024). 가상 냉동사이클을 활용한 공기 열원 히트펌프 시스템의 성능 예측, 한국태양에너지학회, Vol. 44, No. 5, 43-58
4. Barandier, P. and Cardoso, A. J. M. (2023) A Review of Fault Diagnostics in Heat Pumps systems, Applied Thermal Engineering, Vol. 228, No. 120454